

PROCESOS DE ESTEREOLITOGRAFÍA ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

G. LOMBERA*†
G. BUGEDA**
M. CERVERA**
E. OÑATE**

**Instituto Nacional de Tecnología de Materiales,
Universidad Nacional de Mar del Plata - CONICET
J.B. Justo 4302, (7000) Mar del Plata - Argentina*

***Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE),
Universidad Politécnica de Cataluña
Edificio C-1 Campus norte UPC (08034) Barcelona España*

RESUMEN

La estereolitografía es una de las técnicas utilizadas en los procesos de fabricación rápida de prototipos, que tiene un gran interés industrial debido a su ahorro en tiempo respecto a los procesos tradicionales. Una de las principales causas de error en las dimensiones finales de las piezas obtenidas es el fenómeno conocido como "distorsión por flexión". El análisis de éstos procesos se realiza en el marco del Proyecto BRITE/EURAM "Development of rapid prototyping technologies based on laser sintering" Nro. BR-5478, conjuntamente con el Politécnico de Torino (Italia) y la Universidad de Stuttgart (Alemania). Para el mismo se ha desarrollado el programa "SLAP", que utiliza el método de los elementos finitos. Se presenta en este artículo dos ejemplos de aplicación y una breve descripción del programa.

SUMMARY

Stereolithography is one of the techniques used in rapid prototyping processes. It has a great industrial interest because it provides time saving respect to traditional manufacturing processes. One of the main sources of error in the final dimensions of the prototype is the curl distortion effect. The analysis of these process is made into the BRITE/EURAM project "Development of rapid prototyping technologies based on laser sintering" Nr. BR-5478, in conjunction with the Politecnico di Torino and the Stuttgart University. To do this, the "SLAP" program was development. This program uses the finite element method. In this article, two applications examples, and a brief description of the program are presented.

INTRODUCCIÓN

Existen diversos procesos de fabricación rápida de prototipos (en inglés: "Rapid Prototyping"), que han surgido en la última década y son cada vez más utilizados por las industrias. Estos procesos se basan en la fabricación de un objeto a partir de su representación tridimensional en un ordenador [1]. Los datos geométricos de la pieza se utilizan para controlar un rayo láser que incide sobre una resina líquida fotosensible, produciendo el curado de la misma. De acuerdo con el proceso utilizado puede variar el material y la potencia del láser entre otros parámetros.

† Actualmente investigador en el CIMNE

Las ventajas de estos procesos se fundamentan en que no requieren demasiado utillaje, los tiempos de fabricación son inferiores a los de los métodos tradicionales, y poseen una gran versatilidad en cuanto a formas.

El sistema 3D-SYSTEM, desarrollado en California, fue el primero disponible en el mercado. Actualmente ha distribuido unas 300 máquinas alrededor del mundo.

El proceso que este sistema utiliza se denomina estereolitografía y la máquina está esquematizada en la Figura 1.

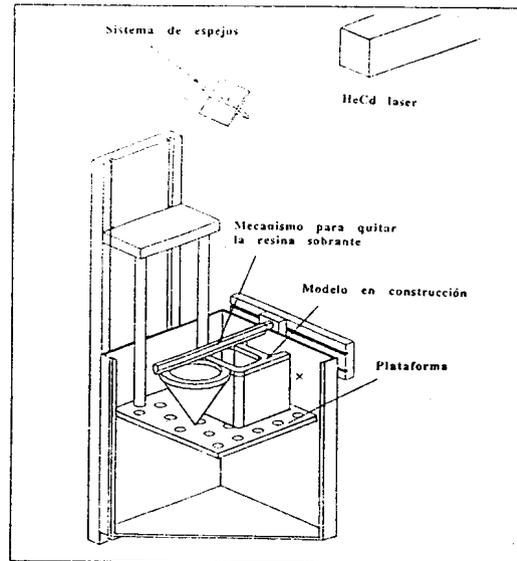


Figura 1 Esquema de funcionamiento de una máquina de estereolitografía.

La resina líquida se coloca en un recipiente dentro del cual se encuentra un soporte móvil sobre el que se va construyendo la pieza. El extremo del soporte se debe mantener a una determinada distancia por debajo de la superficie libre de la resina. Mediante un sistema de galvanómetros con espejos se hace incidir el rayo láser sobre la resina produciendo el curado de la misma (solidificación). La trayectoria del rayo láser está controlada por el ordenador al cual se le introduce mediante un determinado formato CAD la geometría a construir. Existen varios formatos, dentro de los cuales el más utilizado es el SLA, que representa las superficies exteriores de un objeto mediante mallas triangulares. El volumen total se secciona según diversos planos horizontales que determinan las capas que debe solidificar el láser para formar la pieza final. Una vez producida una capa (superficie plana) el soporte desciende y dicha capa es cubierta de resina líquida. El proceso continúa hasta lograr la pieza final [2]. Una de las principales causas de discrepancia entre el modelo diseñado por ordenador y el modelo físico obtenido, es el fenómeno conocido como "curl distortion" (distorsión por flexión). Este tipo de distorsión, que ocurre en todos los procesos de fabricación rápida de prototipos, se debe a la contracción que experimenta la resina al solidificar. Dicha contracción produce un efecto de flexión en las capas producidas anteriormente, tal como puede verse en la Figura 2.

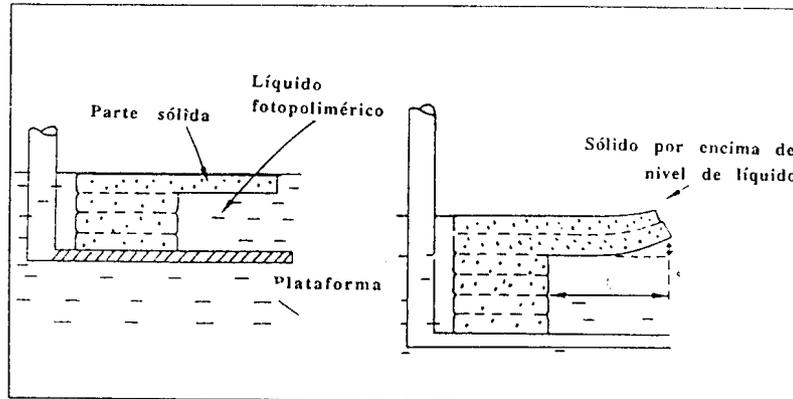


Figura 2 Esquema del mecanismo de distorsión por flexión.

IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

El Programa "SLAP" (Stereolithography Analysis Program) [4] fue implementado para simular el proceso de estereolitografía utilizando el método de los elementos finitos. En el mismo se modela el proceso constructivo por capas, el poscurado y las deformaciones finales producidas al extraer la fijación del piso después del poscurado.

El programa permite resolver problemas bi y tridimensionales utilizando elementos cuadrangulares de cuatro y ocho nodos en 2-D y de ocho y veinte nodos en problemas tridimensionales.

A partir del archivo CAD de la pieza y teniendo en cuenta el espesor de capa, es posible generar la malla de elementos finitos. El proceso de modelado se realiza capa a capa, teniendo en cuenta el coeficiente de contracción volumétrica.

Como se mencionó en la introducción, la distorsión por flexión se debe a la contracción volumétrica que experimenta cada capa de resina al solidificar. Esta contracción produce deformaciones en el material que solidificó anteriormente. Para modelar este efecto, se implementó el cálculo de las fuerzas nodales equivalentes en los elementos de la última capa a partir de las deformaciones iniciales. Para sólidos bidimensionales con un comportamiento elástico-lineal la expresión utilizada para ello es:

$$f_i^{(\epsilon)} = \int \int_{A^{(\epsilon)}} B^T D \epsilon^0 dA$$

donde ϵ^0 es la contracción volumétrica de la resina, B es la matriz de deformación del elemento y D es la matriz constitutiva.

El vector de fuerzas debidas a deformaciones iniciales del nodo i en sólidos tridimensionales es:

$$f_i^{(\epsilon)} = \int \int \int_{V^{(\epsilon)}} B_i^T D \epsilon^0 dV$$

siendo:

$$\epsilon^0 = [\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, 0]^T \quad (\text{en problemas 2D})$$

$$\epsilon^0 = [\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \epsilon_z^0, 0, 0, 0]^T \quad (\text{en problemas 3D})$$

Al programa se le introduce como dato inicial la geometría total del objeto a modelar discretizado por capas y el problema se resuelve capa a capa, de manera que se reproduzca el proceso real de fabricación, actualizando en cada resolución la geometría del conjunto. Esto se implementó guardando en un archivo temporal los

valores de los desplazamientos nodales de cada resolución, de manera que al resolver la capa "i+1", las coordenadas de los nodos que forman las "i" capas anteriores son las actuales más los desplazamientos obtenidos en la resolución de la capa "i".

El programa contempla distintos elementos: cuadriláteros de 4 y 8 nodos para análisis bidimensional y hexahédricos de 8 y 20 nodos para análisis tridimensional. Los elementos de cuatro nodos en 2D y los de 8 nodos en 3D, no proporcionan buenos resultados a flexión. Por otro lado, la utilización de elementos cuadráticos produce un gran aumento del coste computacional de este tipo de análisis. Por ello, se ha implementado una técnica de integración selectiva que mejora notablemente los resultados [6]. La técnica utilizada para eliminar el exceso de deformación tangencial intrínseco del elemento es evaluar los términos correspondientes a dichas deformaciones con una cuadratura de Gauss-Legendre reducida [6]. Para ello se divide la matriz de rigidez en la suma de una matriz que contiene los términos volumétricos K_v y otra que contiene los términos de deformación tangencial K_t . Así, para el caso bidimensional:

$$K^{(e)} = K_v^{(e)} + K_t^{(e)}$$

con:

$$K_{v_{i,j}}^{(e)} = \int \int_{A^{(e)}} B_{v_i}^T D_v B_{v_j} dA \quad ; \quad K_{t_{i,j}}^{(e)} = \int \int_{A^{(e)}} B_{t_i}^T D_t B_{t_j} dA$$

siendo

$$B_{v_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \quad ; \quad B_{t_i} = \left[\frac{\partial N_i}{\partial x}, \frac{\partial N_i}{\partial y} \right]$$

$$D_v = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \quad ; \quad D_t = [d_{33}]$$

donde, para tensión plana:

$$d_{11} = d_{22} = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

$$d_{12} = d_{21} = \nu d_{11}$$

$$d_{33} = \frac{E}{2(1 + \nu)} = G$$

siendo E el módulo de elasticidad y ν el coeficiente de Poisson.

La matriz K_v se calcula con una cuadratura de 2x2 puntos, mientras que K_t se obtiene utilizando una cuadratura reducida de un solo punto, lo que implica simplemente evaluar el integrando en el centroide del elemento. En el caso de sólidos tridimensionales se realiza el mismo esquema de descomposición de la matriz de rigidez, con las matrices B y D para tres dimensiones.

RESULTADOS

a) Viga en voladizo

Se analizó el test extraído de la referencia [2] que se esquematiza en la Figura 3. El mismo consiste en unos voladizos gemelos fabricados con el proceso de estereolitografía mediante 24 capas de 0.25 mm de espesor. Se mide con este test el factor de distorsión por flexión cuya expresión es:

$$C_{f6} = \frac{(M_6 - M_0)}{6mm} * 100 = \frac{\Delta Z}{6mm} * 100$$

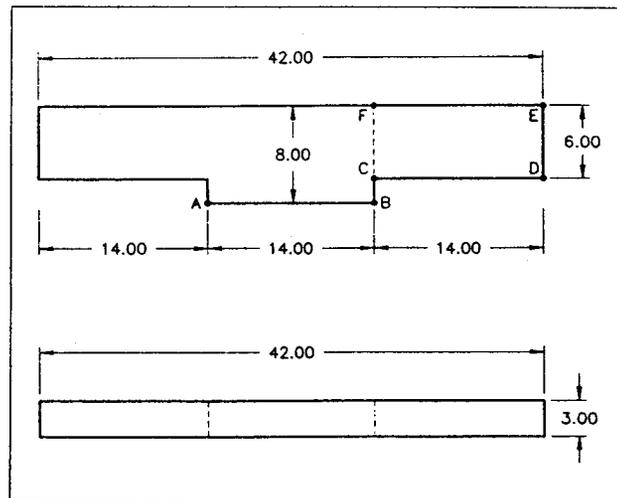


Figura 3 Geometría utilizada para el test.

donde M_0 es la elevación en milímetros del origen de la base del voladizo, M_6 es la elevación en milímetros de la parte inferior de la viga medida a 6 milímetros del origen de la base y ΔZ es la diferencia entre estos dos valores ($\Delta Z = M_6 - M_0$). La pieza es simétrica, y la base AB está fija a la plataforma, por lo que se ha modelado únicamente el sector de la viga CDEF. Se supone la condición de simetría en el lado CF. Los resultados que se muestran corresponden a un análisis realizado con elementos hexaédricos de ocho nodos con integración selectiva. En la Figura 4 se muestra la malla utilizada, y la pieza final. En la Figura 5 se compara la curva de variación de los ΔZ obtenidos experimentalmente en [2] y con nuestro análisis.

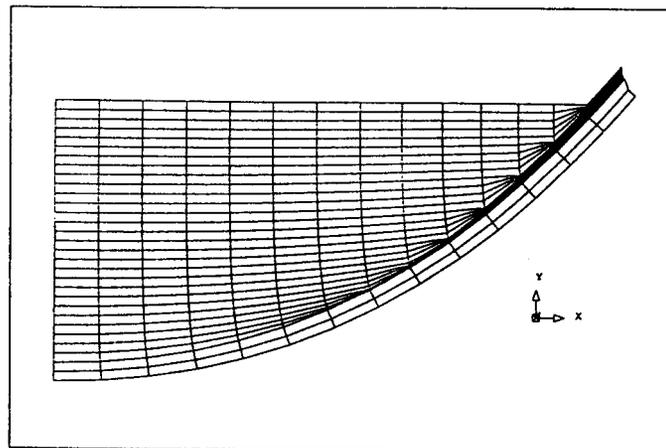


Figura 4 Malla utilizada y pieza resultante.

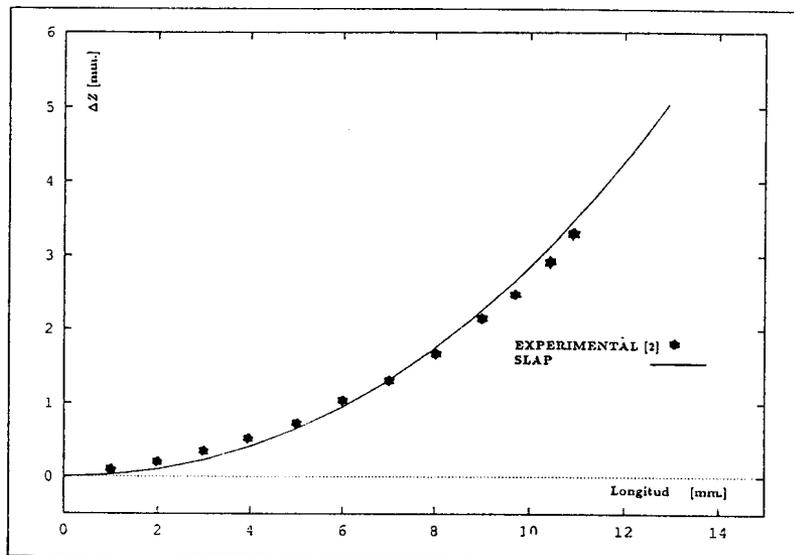


Figura 5 Comparación de resultados

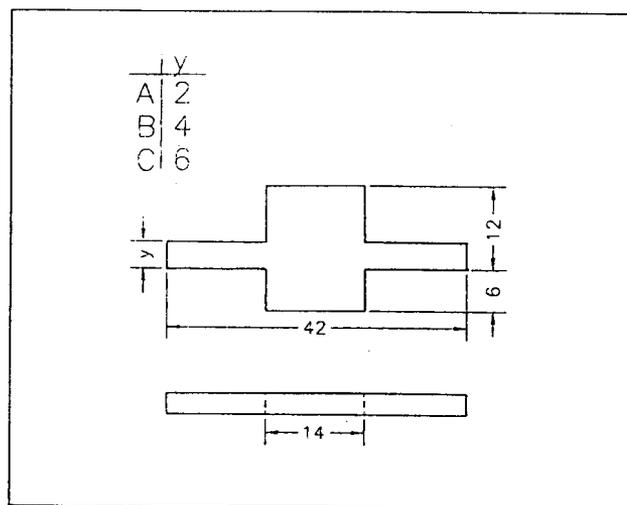


Figura 6 Vigas a analizar

En el marco del proyecto BRITE/EURAM Nro.5478 en que se desarrolla éste trabajo se han realizado análisis experimentales de este ejemplo por parte del Politécnico de Torino (Italia), socio del proyecto. Los mismos consisten en el estudio de vigas que difieren entre sí en la altura del voladizo. Se analizaron tres tipos de vigas cuya geometría a está esquematizada en la figura 6, y para cada tipo un conjunto de cuatro vigas ubicadas en distintas posiciones en la máquina de estereolitografía. La figura 7 muestra comparativamente la geometría inicial y final obtenida con un análisis realizado con el programa "SLAP" con elementos hexaédricos de ocho nodos. La gráfica corresponde al ejemplo de $y=2$ mm con un espesor de capa de 0.2 mm. en la figura 8 se muestran los desplazamientos verticales de la base de la viga obtenidos con el programa SLAP y los resultados experimentales obtenidos para las cuatro vigas de $y=2$ mm. El coeficiente de contracción volumétrica usado es de $e=-0.003$. El mismo se extrapola de la curva "Curl distortion" vs coeficiente de deformación volumétrica dada en la referencia 4 (en la que se puede apreciar un comportamiento lineal). A partir del "curl distortion" obtenido experimentalmente se obtuvo el coeficiente de contracción volumétrica, dado que no se tenía su valor experimental.

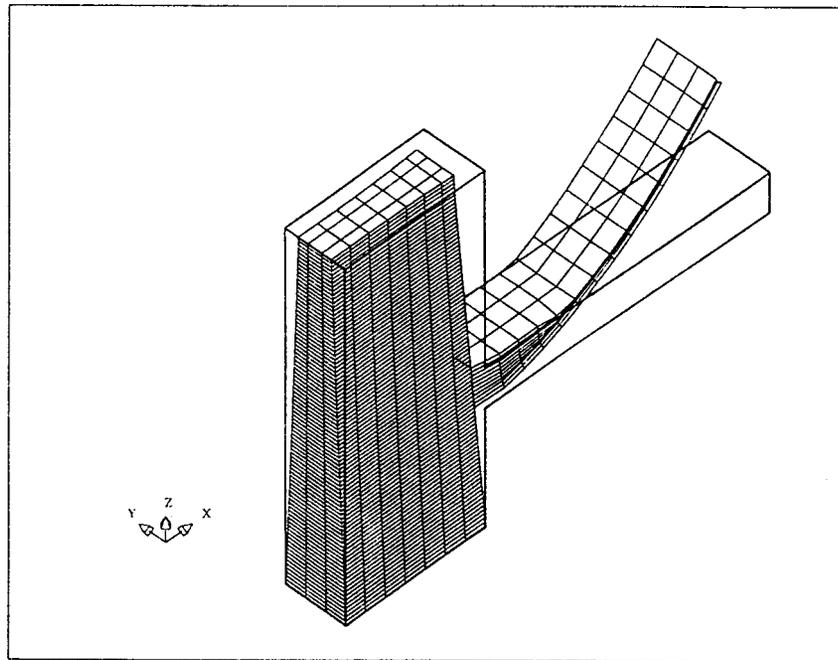


Figura 7 Geometría inicial y final para $y=2$ mm.

Los resultados que se muestran se obtuvieron utilizando elementos hexaédricos de ocho nodos. En el modelado del proceso se tienen en cuenta tres etapas: el proceso constructivo propiamente dicho, el posurado y por último la separación entre la pieza y el soporte, en donde las reacciones que se han producido actúan como fuerzas localizadas aplicadas en dirección opuesta.

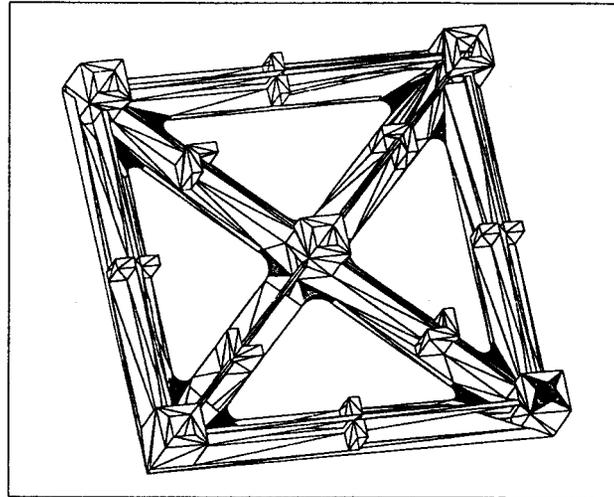


Figura 10 Geometría del CAD

En la figura 11 se puede ver comparativamente las geometrías inicial y final obtenida después del posurado.

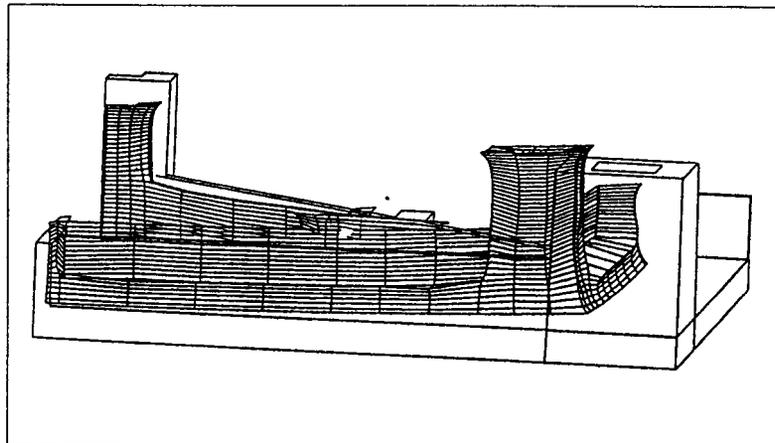


Figura 11 Pieza resultante

CONCLUSIONES

Del análisis de los ejemplos estudiados en el presente trabajo, se observa una buena correlación entre los resultados experimentales y los obtenidos por nuestro programa. El poder predecir los niveles de distorsión de piezas construidas por procesos de estereolitografía, así como la influencia de diversos parámetros constructivos en la geometría final [4], tienden a optimizar el costo del proceso, permitiendo la correcta selección de los parámetros de funcionamiento de los equipos a los efectos de obtener mayor precisión en las dimensiones finales de los prototipos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Proyecto BRITE/EURAM "Development of rapid prototyping technologies based on laser sintering", Contract Nr. BRE2-CT92-0228 Project Nr. BR-5478. El primer autor agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina (CONICET), que posibilitó su estancia en el CIMNE mediante una beca externa de dicho Consejo.

REFERENCIAS

1. M.C. Shellabear, H. J. Langer y M. Cabrera, "The EOS Rapid Prototyping System", *Proceedings of the 1st European Conference on Rapid Prototyping*, pp. 19-26, Nottingham (1992).
2. P. Jacobs, "Rapid Prototyping and Manufacturing Fundamentals off Stereolithography", *Society of Manufacturing Engineers*, First Edition, (1992).
3. G. Lart, "Comparison of Rapid Prototyping System", *Proceedings of the 1st European Conference on Rapid Prototyping*, pp. 243-254, Nottingham (1992).
4. G. Lombera, G. Bugeda, M. Cervera, E. Oñate, "SLAP: Programa para modelado numérico de procesos de estereolitografía utilizando el método de los elementos finitos", *Publicación CIMNE Nro. 47*, Universidad Politécnica de Catalunya (1994).
5. O.C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, "The finite element method", *McGraw Hill, 1989 (Vol. I) and 1991 (Vol. II)*.
6. E. Oñate, "Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos - análisis estático", *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Primera edición, Enero de 1992*.